７－２　重金属類を溶出抑制した下水汚泥焼却灰の資源化調査

計画調整部技術開発課　緒方孝次　宮本彰彦　北村清明
杉山佳孝（現 日本下水道事業団）

１　調査目的

汚泥焼却炉の整備により、平成 15 年度から東京都区部の下水道事業では発生する汚泥の全量を焼却処分している。年間約 110 万 t の脱水汚泥焼却量に対し、約 5 万 t の汚泥焼却灰（以下「焼却灰」という）が発生しているが、セメント原料、粒度調整灰、軽量細粒材などの建設資材として利用されているのは約半分で、残りの半分はセメントと混練し、埋め立て処分している。

焼却灰には微量ながら重金属類（砒素、セレン、カドミウム、鉛、六価クロム、水銀等）が含まれており、このうち特に砒素、セレンについて溶出する場合がある。近年、汚泥焼却炉の集じん方式として集じん温度の低いバグフィルターやセラミックフィルターが採用され、この傾向は強くなってきている。

焼却灰の有効利用にあたっては、重金属類の溶出に関する法的な基準等はないが、資源化製品が土壌と直接接触することを考慮すると、利用する際の焼却灰が土壌環境基準（平成 3 年環境省告示第 46 号）を満たすことが望ましい。さらには、平成 15 年 2 月から土壌汚染対策法が施行され､重金属類について溶出量基準に加え含有量基準が定められたほか、土壌の汚染原因者に修復責任が問われることとなるなど、有効利用における安全確保は重要性を増している。

重金属類の溶出を抑制することが可能となれば安全なものとして扱うことができ、有効利用の促進、及び資源化率の向上が期待できる。当課では、焼却灰に硫酸第一鉄とチオ硫酸ナトリウムを添加し、過熱することで重金属類を溶出抑制した焼却灰（以下「溶出抑制灰」という）とする技術の開発に平成 14 年度から取り組んでいる。これまでの試験室レベルでの調査結果では、硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1%を同時に添加し、150℃程度で加熱処理を行うことで土壌環境基準を満足する溶出抑制効果を得ている。

引き続き、平成 15 年度の調査では、当技術の実証設備を建設して運用し、実用化に向けた検証と評価を行ったのでここに報告する。

２　調査内容

２．１　調査期間

平成 15 年 7 月 30 日から平成 16 年 3 月 25 日まで

２．２　製造技術実証調査

葛西水再生センター内に溶出抑制灰を製造する実験プラント（設計処理能力 30～50kg/h）を設置し、製造技術の実証試験を行うとともに 48 時間にわたる連続運転を実施した。

実証試験にあたっては、薬品添加率や加熱温度等の運転条件を変化させ、処理条件の適正化に対する検討を行った。

なお、調査には集じん方式としてバグフィルタが採用されている葛西水再生センター5

号炉、及び東部スラッジプラント 3 号炉で発生した焼却灰を用いた。

２．３　植栽基盤適用性調査

溶出抑制灰と建設発生土を混合した土壌（以下「灰混合土壌」という）について、植栽を実施し、植栽基盤としての適用性を調査した。調査はパンジー等の草花の生育が順調であるか、また、降雨暴露により重金属類が溶出しないかを 4 ヶ月間にわたり確認した。

なお、建設発生土は東京都下水道局建設発生土改良プラント（以下「発生土改良プラント」という）に搬入された土を使用した。

２．４　溶出試験方法について

焼却灰の pH が高い場合、重金属類はカルシウムなどと難溶性塩を形成するため、溶出は抑えられる。しかし、これが酸性雰囲気になると溶出することがある。溶出抑制灰を有効利用する場合、酸性雨等の影響から酸性条件下における利用も想定される。

土壌環境基準に対し重金属類の溶出量を評価する場合、その試験方法には溶媒として脱イオン水を用いる方法（平成 3 年環境省告示第 46 号法（以下、環告 46 号法））が採用される。一方、公定法ではないが土木研究所が提唱している炭酸連続法は、酸性条件下を想定した pH4.0 に調整した炭酸飽和水を溶媒として用いる試験法である。そこで、当技術をより確実性の高い技術するため、炭酸連続法による溶出試験についても行い、溶出処理灰の安全性評価を行った。

表2．1　溶出試験方法の比較

条　件	環告 46 号法	炭酸連続法
試料性状	5mm 以下に粉砕	有姿のまま
溶　媒	脱イオン水 (初期 pH=5.8～6.3)	CO_2 飽和水 (初期 pH=4.0)
pH 調整	溶出試験中は未調整	CO_2 ガスを連続吹込み
溶媒/試料比	10/1	10/1
溶出時間	6 時間連続振とう	24 時間連続攪拌
ろ　紙	1.0μm	0.45μm
攪拌方法	水平振とう約 200 回/分	攪拌棒　約 200 回/分

３　溶出抑制処理のメカニズム

当処理方法は、汚泥焼却灰に硫酸第一鉄（化学式：$FeSO_4 \cdot 7H_2O$）とチオ硫酸ナトリウム（化学式：$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$）を水溶液として添加・混合し、150℃程度で加熱することによって、重金属類(主に砒素とセレン)の溶出が抑制される処理プロセスである。

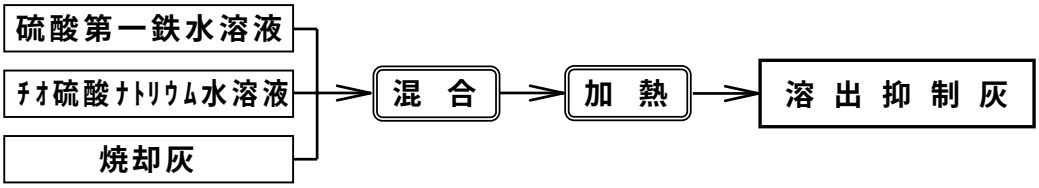


図３．１　処理フロー

当処理方法のメカニズムは、以下のように推測される。（**表3．1**参照）

（１）硫酸第一鉄添加

砒素、セレンは陰イオンの形態（AsO_3^{3-}, AsO_4^{3-}, SeO_3^{2-}, SeO_4^{2-}）で溶出するため、陰イオン吸着源となる鉄を硫酸第一鉄水溶液として焼却灰に添加する。硫酸第一鉄は水によく溶けるため、水溶液とすることで Fe^{2+}は SO_4^{2-}と解離し、粉末試薬の状態よりも拡散される。これを焼却灰と混合することで、Fe^{2+}を均一に焼却灰に供給できる。

（２）チオ硫酸ナトリウム添加

チオ硫酸ナトリウムは、還元剤としての作用を目的として、水溶液として焼却灰に添加する。硫酸第一鉄と同様に水によく溶けるため、水溶液を焼却灰に混ぜることで、チオ硫酸ナトリウムを均一に焼却灰に供給できる。同時に、水は加熱プロセスでチオ硫酸ナトリウムと反応して、硫化水素の発生源となる。

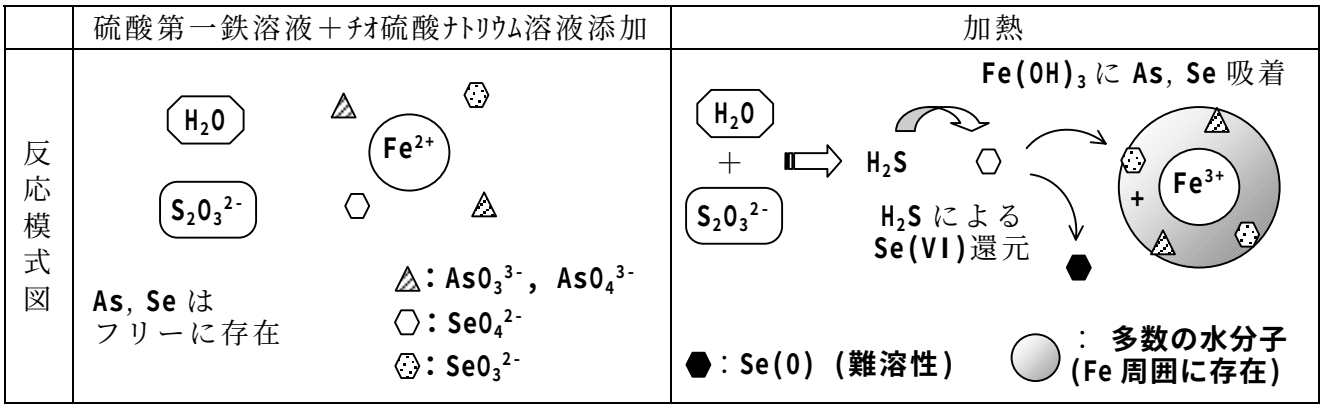
（３）加熱

加熱により硫酸第一鉄中の鉄は酸化され、３価の水酸化鉄 $Fe(OH)_3$ が生成する。水酸化鉄は水分子を配位することで陰イオンを吸着するため、陰イオン形態で溶出する砒素、セレンが不溶化される。

また、チオ硫酸ナトリウムを水の存在下で加熱すると硫化水素が発生し、これが還元剤として機能するため水酸化鉄では不溶化されにくい 6 価のセレン（SeO_4^{2-}）を 4 価（SeO_3^{2-}）に、さらには 0 価にまで還元する。4 価のセレンは水酸化鉄により吸着、不溶化され、0 価のセレンはそのままで不溶態となる。

なお、カドミウムは、硫酸第一鉄を添加して加熱しただけでは易溶性形態である硫酸カドミウムとなるため、新たなカドミウム溶出が懸念される。しかし、硫酸第一鉄とチオ硫酸ナトリウムを同時に添加し、加熱することで、易溶性形態である硫酸カドミウムが還元されて難溶性の亜硫酸カドミウムが生成するため、溶出が抑制される。

表３．１　砒素・セレンの溶出抑制処理メカニズム



４　製造技術実証調査

４．１　実証設備

当技術の実証設備の装置化に当たっては、薬品の添加、過熱の処理操作が連続的に行えることを前提として設計した。

実証設備のシステム構成を**図 4.1**に、外観を**図４．２**示す。灰供給フィーダから焼却灰を定量的に切り出し、処理装置に送り込む過程で薬品溶液を定量的に添加、混合する。処理装置内部では、薬品と混合した焼却灰を加熱しながら撹拌することで、溶出抑制反応を進行させる。処理が完了した溶出抑制灰は溶出抑制処理装置から払い出される。また、処理装置から抜き出した排ガスは、排ガス処理装置でばいじんの除去、水蒸気の除湿、及び有害ガス(H_2S など)の吸収を行い大気に放出される。

処理装置本体の構造には、加熱と混合を効率良く行えるよう容器回転型として、外部加熱を行えるジャケットを有した「横型回転ドラム式」を採用した。1 時間あたりの焼却灰処理量 30～50kg、容器内滞留時間 20～30 分、ドラム内充填率 10～20%、以上を設計条

件とした結果、処理装置の回転ドラムの寸法はφ400×1600mm（　0.2 m^3）となった。

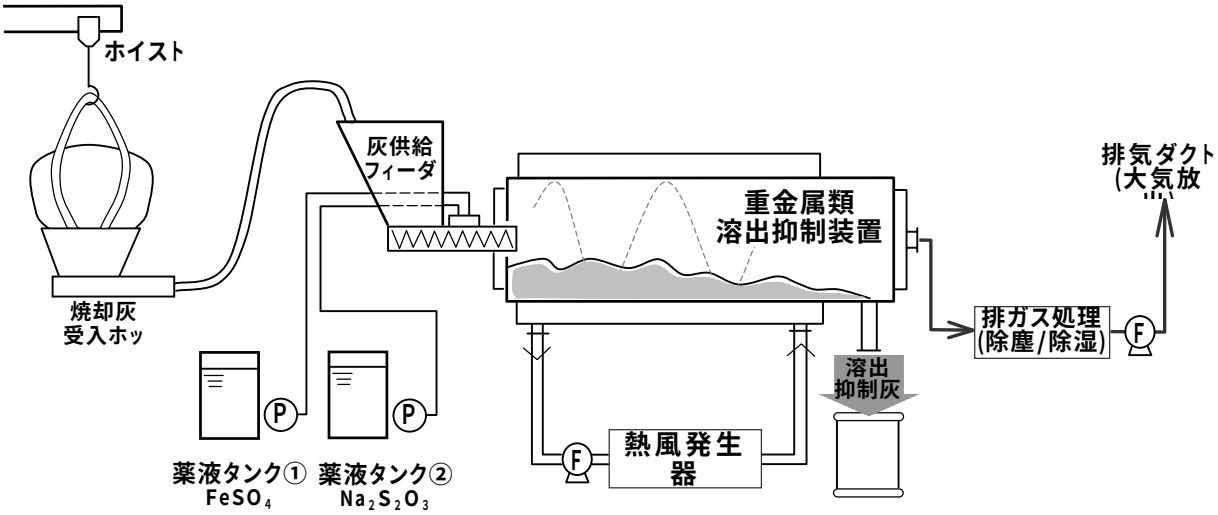


図４．１　システムフロー

図４．２　実証設備外観

４．２　実証実験における運転条件

各処理条件の変更は以下の操作によって行った。

（１）処理量

溶出抑制装置への原灰の切り出しは、灰供給フィーダによって行われる。スクリューの回転による灰の切り出しについては、回転速度と切り出し量に高い相関があるため、回転数を調節することで処理量を設定した。

（２）薬品添加率

薬品（溶液）の添加率は、ダイヤフラム式の容積型ポンプのストローク調整を行うことで設定した。

（３）加熱温度

処理プロセスにおける加熱操作は処理装置の加熱ジャケットへの熱風通風による。熱風発生器出口には調節計を介した温度計を設け、加熱温度を設定した。

（４）処理時間

溶出抑制装置のドラム回転速度によって滞留時間を調節できるので、粉体の投入から排出ピークがあるまでの時間を平均滞留時間として、これを処理時間とした。

（５）排ガス誘引量

排ガス抜き出しファン入口に設けたダンパの開度により、排ガスの誘引量を調節した。

４．３　運転条件の最適化調査結果

実証設備の基礎的な特性を把握するために、各処理条件が処理特性に与える影響を調査した結果を以下に示す。

４．３．１　加熱温度の影響

加熱温度を上げることにより処理時間が短縮できると予想される一方で、加熱温度が高過ぎた場合には運転コストが上昇するだけでなく、溶出抑制効果が悪化することも懸念される。

そこで、処理条件のうち加熱温度のみを 150～250℃に変化させ、各条件における処理灰の重金属類溶出量を調査した。その結果を**表４．１**に示す。

前述のように、チオ硫酸ナトリウムを加熱することで発生する硫化水素が溶出抑制に作用していることから、加熱温度を高くすることで硫化水素の発生が促進され、理論的には溶出抑制効果は高くなると考えられる。しかし、当結果では、150℃から 250℃の範囲では加熱温度による溶出量の大きな違いは見られなかった。

一方では、150℃の運転では装置内部への処理灰付着量が多くなり、安定運転を行うことが難しくなった。加熱温度を上げることにより処理灰の乾燥が促進し、装置内部への粉体の付着や閉塞が解消されるなど設備の安定性が向上した。

表４．１　加熱温度の影響

条件	重金属類溶出量 mg/L		
	As	Se	Cd
原灰（未処理）	0.49	0.84	<0.01 (0.002)
加熱温度 150℃	<0.01 (0.000)	0.01 (0.012)	0.01 (0.012)
加熱温度 200℃	<0.01 (0.000)	0.01 (0.012)	<0.01 (0.006)
加熱温度 250℃	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)
環境基準	0.01	0.01	0.01

備考）薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1.5%

４．３．２　処理時間の影響

溶出抑制処理が装置内で行われるために必要な時間を確認するため、溶出抑制装置のドラム回転速度を変化させ、各条件における処理灰の重金属類溶出量を調査した。回転速度を、2、3rpm の各条件とした場合、焼却灰の装置内における平均滞留時間はそれぞれ 20、15 分程度である。

結果を**表４．２**に示すが、当結果からは各溶出量に処理時間の影響はみられていない。

表４．２　処理時間の影響

条件	重金属類溶出量 mg/L		
	As	Se	Cd
原灰（未処理）	0.49	0.84	<0.01 (0.002)
処理時間 20 分 (2rpm)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)
処理時間 15 分 (3rpm)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	0.01 (0.010)
環境基準	0.01	0.01	0.01

備考）薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1.5%

４．３．３　薬品添加率の適正化

昨年度までのビーカーテストによる結果では、１mg/L 程度の砒素、セレンを溶出する焼却灰に対して、溶出抑制処理に必要な薬品添加率は「硫酸第一鉄 3%＋チオ硫酸ナトリウム 1%」であると考えていた。処理装置化によって薬品の反応性が低下して、必要薬品量が増加することも懸念されたため、薬品添加率を変化させ溶出抑制効果を確認した。

分析値の一例を**図４．３**に示すが、薬品添加率の違いを比較した試験の結果からは、Run２(硫酸第一鉄 1.0%＋チオ硫酸ナトリウム 0.5%)の溶出抑制灰の砒素溶出量が土壌環境基準を超過する結果となった。硫酸第一鉄由来の鉄を核とする水和物が砒素、セレンを固定化することから、硫酸第一鉄の添加量を減らしたことで固定化しきれなかった砒素が溶出してきたものと推察される。また、チオ硫酸ナトリウムについては添加率の相違による溶出抑制効果の違いは確認できなかった。

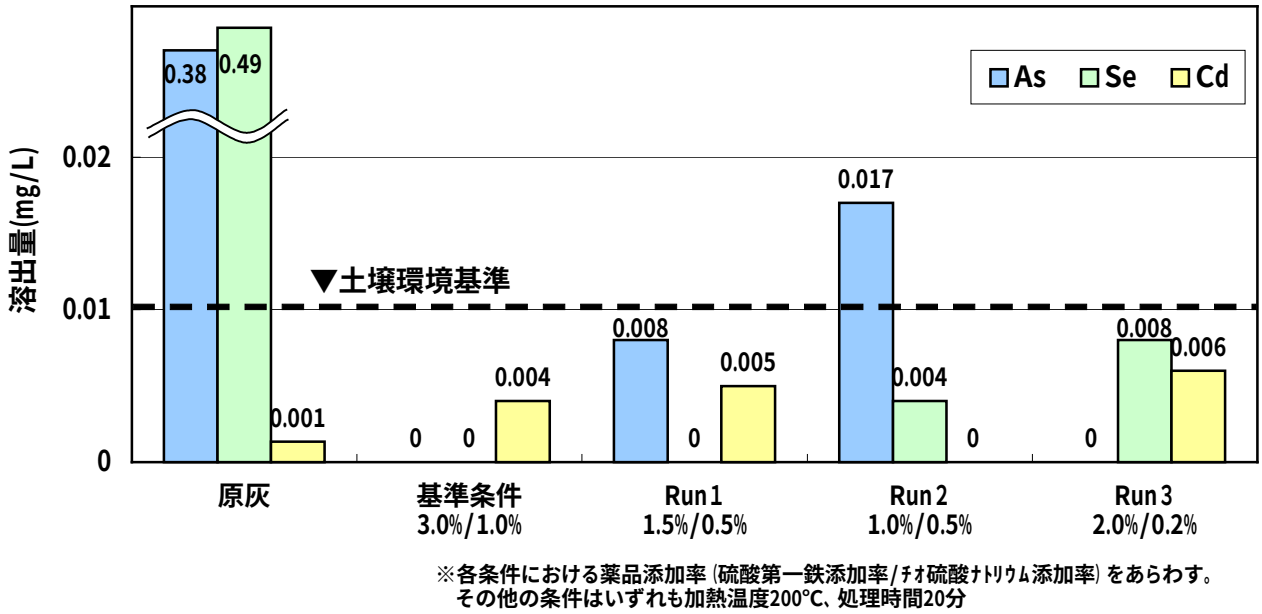


図４．３　薬品添加率による影響

今回試験に使用した程度の性状の焼却灰であれば、目安として硫酸第一鉄は 1.5%～2.0%、チオ硫酸ナトリウムは 0.5%程度の添加率で溶出を抑制でき、ビーカーテストよりも少ない薬品添加率で溶出抑制が可能であることが確認できた。この要因として、実証設備においてはドラムの回転により焼却灰と薬品が効果的に攪拌され、薬品が効果的に反応したためと考えられた。

４．３．４　酸性条件下での溶出特性

土壌環境基準と比較して溶出量を評価する場合、その試験方法には溶媒として脱イオン水を用いる試験法（環告 46 号法）が採用される。一方、炭酸連続法は酸性条件下を想定した pH4.0 に調整した炭酸飽和水を溶媒として用いる試験法である。

そこで、同一試料を環告 46 号法、炭酸飽和法の両試験法による溶出試験を行い、結果を比較することで、溶出抑制灰の安全性評価を行った。結果を**図４．４**に示すが、原灰に対する試験結果では、炭酸連続法による試験を行うことで砒素、セレンの溶出量が増加しており、これは、酸性条件下において溶出量が増加することを示唆する。

一方、溶出抑制灰においては、炭酸飽和法による試験結果においても溶出量は増加していない。つまり、溶出抑制処理を行った焼却灰は、酸性環境中においても重金属類を溶出させず、当溶出抑制手法が酸性条件下における溶出抑制についても有効であることが確認できる。

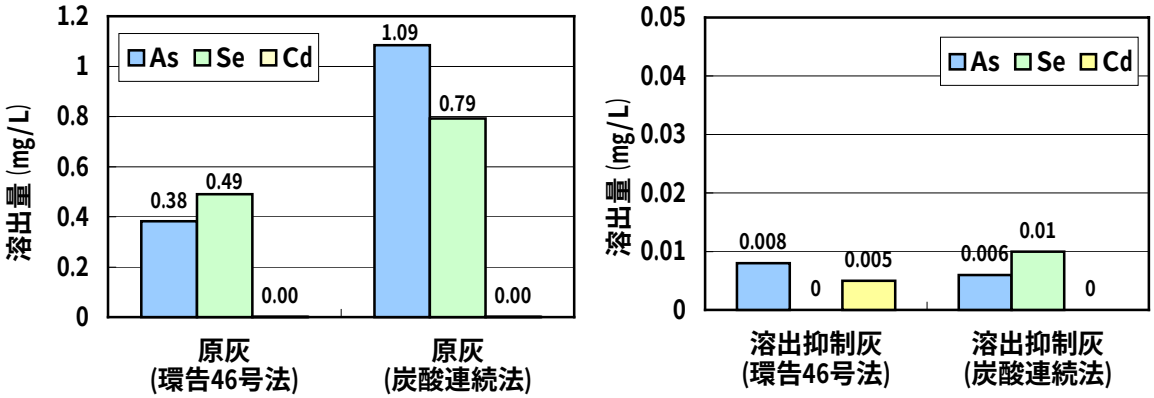


図4．4　溶出試験方法の相違による溶出量の違い

４．３．５　その他の重金属類の溶出量

これまで、砒素、セレン、及びカドミウムについて、溶出抑制の効果を確認してきたが、その他の重金属類に対する溶出抑制効果を確認するため、一部の試料については鉛 Pb、六価クロム Cr^{6+}、水銀 T-Hg を含む 6 成分の溶出量を測定した。その、結果を表４．５に示すが、カドミウム、鉛、六価クロムについては、未処理の焼却灰（原灰）においても溶出量は環境基準以下であり、溶出抑制灰についても同様の結果である。

表4．5　重金属類の溶出量

条件	重金属類溶出量　mg/L						備考
	As	Se	Cd	Pb	Cr^{6+}	T-Hg	
原灰 A (未処理)	0.49	0.84	<0.01 (0.002)	—	—	—	
Run4	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
原灰 B (未処理)	0.47 (0.468)	0.78 (0.780)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	<0.0005 (0.0000)	
Run5	<0.01 (0.000)	0.01 (0.012)	<0.01 (0.006)	<0.01 (0.005)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.0003)	
Run6	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.0003)	
原灰 C (未処理)	0.11 (0.110)	0.39 (0.390)	<0.01 (0.001)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)	0.0006	
Run7	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	0.0065	
環境基準	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.0005	

※　各 Run の処理条件は以下のとおり
Run4：加熱温度 200℃、処理時間 20 分、薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1.5%
Run5：加熱温度 200℃、処理時間 20 分、薬品添加率は硫酸第一鉄 2.5%、チオ硫酸ナトリウム 0.7%
Run6：加熱温度 250℃、処理時間 20 分、薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1%
Run7：加熱温度 200℃、処理時間 20 分、薬品添加率は硫酸第一鉄 3%、チオ硫酸ナトリウム 1.5%

しかし、水銀については、原灰Ｃに対して処理を行ったところ、溶出量が増加し、環境基準を超過している。

４．４　長時間連続運転調査

実証設備を連続して稼動することにより、長時間運転時の設備の状態を把握し、実設備化するにあたっての課題を抽出するとともに、運転管理手法を確立することを目的として、48 時間にわたる連続運転を行った。

連続運転期間中の運転条件は**表4.6**のとおりとし、焼却灰供給量は、焼却灰の消費量及び切り出し重量を実際に計量し、変動が見られた場合にはフィーダ回転数を調節した。

表4.6　連続運転条件

項目	設定値
原灰供給量	40kg/h
薬品添加率	硫酸第一鉄 3% チオ硫酸ナトリウム 1%
加熱温度	200℃
処理時間	平均 20 分

４．４．１　運転状況

連続運転期間中、施設が緊急停止するような大きな問題はなく、48 時間で計 1700kg の焼却灰について処理を行うことができた。

以下に示すようなトラブルが発生したが、装置のシステム構成や仕様の見直しが必要となるような問題ではなく、このまま実用運転を行った場合でも装置として実用に耐え得るものと考える。

（１）　薬品添加量の低下

運転開始から 10 時間経過後、硫酸第一鉄供給ポンプの吸い込み部にあるフィルタに目詰まりが発生し、一時的に添加量が低下した。薬液タンク液面レベル及び薬液タンク重量の推移から添加量の低下を確認できたため、焼却灰と薬品の供給を停止し、フィルタ洗浄などの処置を行って不具合を解消した後に供給を再開した。薬品残量などから薬品添加量の低下時間は約 2 時間程度と推定される。

これは、実証試験を通じて初めての現象であり、その間フィルタ部の洗浄は行っていなかったため起こったもので、連続運転を行ったために生じたトラブルではないと考えられた。実設備においては、定期的な清掃を行い、設置環境に配慮して砂塵の浸入などが起こらないような対策を講じる必要がある。

（２）焼却灰供給量の低下

運転開始から 35 時間経過した頃から、焼却灰供給量の低下（最終的には約 15%減）が発生した。これは、原因は不明であるが一時的に焼却灰の切出し量が低下し、相対的に溶媒（水）添加率が増えたことがフィーダ内に焼却灰が付着する原因となり、フィーダ内が閉塞したためさらに切出し量が低下したと考えられる。

なお、事前調査の過程においても、溶媒添加量を減らすことでフィーダ内部への灰付着量が低下することを確認しており、実設備化にあたっては、原料の切り出し装置に制御系（例えばロードセルと自動可変速モータの組み合わせなど）を設置し、供給量の変動を防止するなど、切り出し量の調整機構を設けて常に供給量の適正化を図ることで、トラブルを防止する必要がある。

４．４．２　測定結果

（１）土壌環境基準との比較

連続運転処理を行った溶出抑制灰に対し、溶出試験を行った結果を**表4.7**に示す。水銀を除く各項目については、環境基準を超える溶出はみられていない。

一方、水銀については「**4.3.5 その他の重金属類の溶出量**」における結果と同様に、環境基準を超過する試料がある。

なお、これらの試料に対しては再分析を行ったが、結果は同様であった。

表4.7 溶出抑制灰溶出量

採取時刻※	重金属類溶出量 mg/L					
	As	Se	Cd	Pb	Cr^{6+}	T-Hg
原灰（未処理）	0.16 (0.159)	0.49 (0.492)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (N.D.)
4時間後	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	0.0009
16 時間後	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	0.0008
28 時間後	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	0.0011
40 時間後	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.00044)
46 時間後	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.0005 (0.00047)
環境基準	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0005

※採取時刻は連続運転開始後の経過時間

（２）水銀の溶出

この原因の一つとして、原灰に含まれる水銀が多いことが考えられる。水銀の沸点は357℃であり、従来の排ガス処理装置（サイクロン＋電気集塵機）においては気化したまま通過し、ほとんど捕捉されていなかった。しかし、近年は集塵装置としてバグフィルタ等が採用され、集塵温度が低くなっているため（200～250℃）、焼却灰に付着、移行している割合が増えていると考えられる。しかし、原灰において溶出を検出していない一方で、処理後に溶出が起こっていることから、処理プロセスに要因があると考えられる。

焼却灰の成分や処理条件などから存在する可能性のある水銀化合物について、**表4.8**に示す。溶出抑制処理は還元反応であることから、Hg(0)の生成が溶出要因と考えられる。

なお、溶解度が高く溶出が懸念される HgO や Hg_2SO_4 については存在する可能性が低く、その他の化合物についても環境基準を大きく超えて溶出する可能性は低いと考えられる。

表4.8 水銀の溶出形態

	溶解度 [g/dm³]	溶出の可能性について
Hg(0)	2.5×10^{-5}	0.025mg/L までなら溶出する可能性がある
Hg(II)O	5.2×10^{-2}	原灰の方が HgO の存在する可能性が高い
Hg(II)SO_4	―	溶出しない
Hg(I)$_2SO_4$	0.35～0.47	Cd についても同様の反応により溶出する可能性がある 処理プロセスを経て Hg_2SO_3 になる可能性が高い
Hg(I)$_2SO_3$	1.5×10^{-11}	溶出しない
Hg(II)S	1.25×10^{-5}	処理プロセスを経て Hg_2S などになる可能性が高い 0.013mg/L までなら溶出する可能性がある
Hg(I)$_2S$	2.8×10^{-23}	溶出しない

（３）炭酸連続法による溶出量

酸性条件下における溶出特性を確認するため、炭酸連続法による溶出試験を行った結果

を**表4．9**に示す。

前述の「**4．3．4 酸性条件下での溶出特性**」における結果と同様、原灰においては砒素、セレンの溶出量が大きく増加しているが、溶出抑制灰に対しては溶出量に変化がみられず、再度、酸性条件における砒素、セレンの溶出に対する安全性が確認できた。

表4．9 炭酸連続法による溶出試験結果

	環告46号法				炭酸連続法			
	pH	As	Se	Cd	pH	As	Se	Cd
原灰 (未処理)	8.4	0.16 (0.159)	0.49 (0.492)	<0.01 (0.000)	6.1	0.24 (0.240)	0.68 (0.68)	<0.01 (0.002)
28時間後	5.6	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.003)	5.1	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)
46時間後	5.7	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	5.5	<0.01 (0.001)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)
環境基準	―	0.01	0.01	0.01				

5 植栽基盤適用性調査

溶出抑制処理灰の資源化用途のひとつとして、植栽基盤としての適用性を調査した。

建設発生土に溶出抑制灰を10%混合した土壌と、比較のため黒ぼく土、建設発生土（単体）を検査対象とした。

植栽機能試験の結果、灰混合土壌は全炭素、全窒素等の有機質成分が乏しい一方で、植物の生理活動に関与する交換性カリウムや、エネルギー代謝や物質合成に欠くことのできない可給態リン酸が高いなどの特長があった。（**表5．1**参照）

表5．1 植栽基盤適用調査における検査土壌

検査土壌	植栽機能試験結果
灰混合土壌	10mm以下にスクリーニングした建設発生土に、溶出抑制灰を重量比で10%混合した土壌。 固相率は高いが、有効水分保持量、及び透水係数は概ね良好である。土壌pHは7.5の微アルカリ性である。全炭素、全窒素等の有機質成分に乏しいが、交換性カリウムは多く、可給態リン酸は6280mg／kgと非常に多い土壌である。
黒ボク土	比較対照用の土壌。千葉県八街市で採取した黒ぼく土を10mm以下にスクリーニングしたもの。 透水係数、有効水分保持量、三相分布等の土壌物理性は良好である。養分性は、有機質成分、交換性カリウムは良好範囲であるが、可給態リン酸が少ない土壌である。pHは6.9とほぼ中性である。
建設発生土	発生土改良プラントに搬入された石灰添加前の原料土を10mm以下にスクリーニングしたもの。 固相率は高いが、有効水分保持量、及び透水係数は概ね良好である。土壌pHは8.1のアルカリ性であり、良好範囲を若干超える。全炭素、全窒素等の有機質成分に乏しいが、可給態リン酸、交換性カリウムは多い土壌である。

調査は、**図5．1**に示す構造の植栽枡を複数個設置し、各検査土壌を180kg入れて敷きならし、窒素、リン、カリウムを各々20g/m^{2}施肥したものに、パンジーなどの草花を植栽し、草花の生育が長期に渡り順調であるかを確認した。植栽枡は、後方の脚を5cm程高くして、前方から滲出水が採取できる構造としている。

約4ヶ月間の調査期間中、定期的に花径、草丈、葉張りを測定し、これらを生育指数（植

栽当初の数値を 100 として数値化した値）として評価を行った。このうち、パンジーの花径、及び草丈の各指数の経過を**図 5．2**に示す。各検査土壌とも、安定した生育をみせているが、灰混合土壌は、特に花径育指数において大きな数値となっているなど、他の検査土壌と比較して良好な発育をみせていることがわかる。

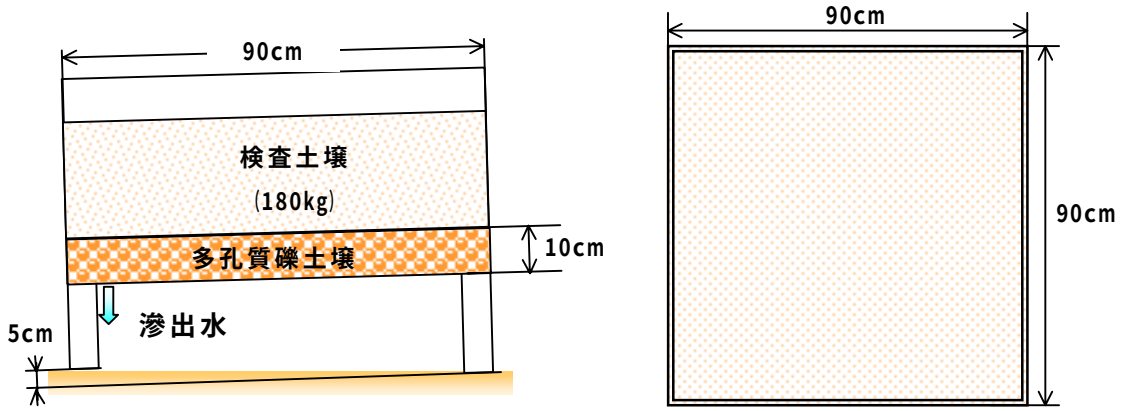


図 5．1　植栽試験枡の構造

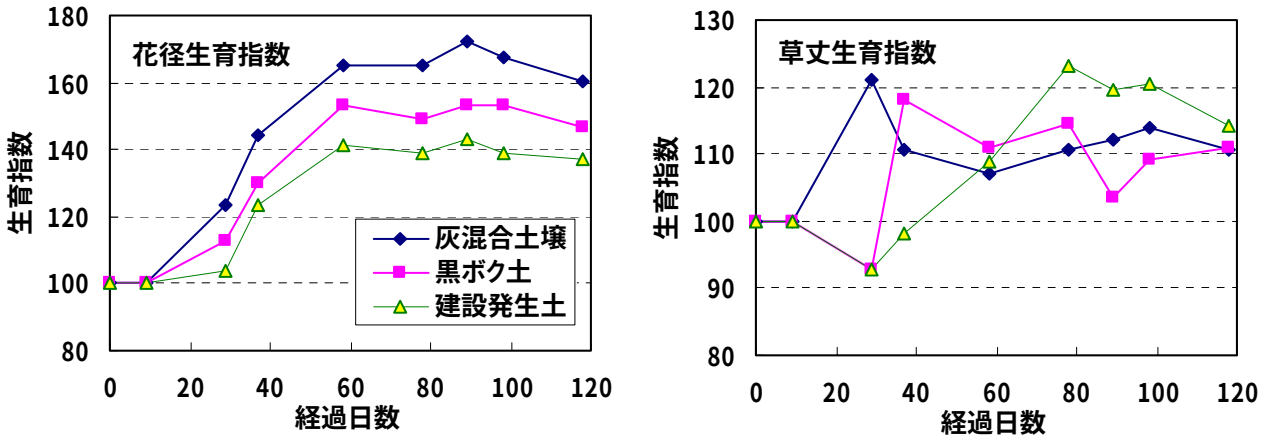


図 5．2　パンジーの各生育指数

さらには、灰混合土壌の降雨時などの排水の安全性を確認するため、植栽枡からの滲出水を採取し、重金属類濃度を確認するとともに、灰混合土壌に対する溶出試験を行った。結果を**表 5．2**に示す。

土壌及びその滲出水は、時間の経過とともに重金属類の溶出量、及び濃度が増加することもなく、4 ヶ月間の調査期間中、土壌環境基準を満足していることから、植栽基盤として有効利用するうえで問題はないと考えられる。

表5．2 灰混合土壌の安全性評価試験

	経過日数	pH	重金属類濃度及び溶出量 mg/L						備考
			As	Se	Cd	Pb	Cr^{6+}	T-Hg	
滲出水における濃度	29 日	7.2	<0.01 (0.008)	<0.01 (0.009)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
	58 日	7.4	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
	118 日	6.7	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.004)	<0.01 (0.002)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
土壌に対する溶出試験	0 日	7.6	0.01 (0.012)	<0.01 (0.009)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	環告 46 号法
	58 日	6.5	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
	118 日	8.1	<0.01 (0.007)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.000)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	
	118 日	6.8	0.01 (0.011)	<0.01 (0.003)	<0.01 (0.000)	<0.01 (0.004)	<0.05 (0.000)	<0.0005 (0.0000)	炭酸飽和法

6 まとめと今後の展望

下水汚泥焼却灰からの重金属類の溶出抑制技術について、実証設備に展開して試験を行った結果、加熱温度 200℃、硫酸第一鉄 1.5～2.0%、チオ硫酸ナトリウム 0.5%程度の処理条件で砒素、セレンなどの重金属類を溶出抑制できることが判明した。

しかし、一部の試料については水銀の溶出量が土壌環境基準を超過することがあった。

今回、設置した横型回転ドラム式の実証装置は、大きなトラブルもなく 48 時間の連続運転を行うことができ、将来の実施設化に向けて、本方式を採用できることが確認できた。

また、建設発生土に溶出抑制灰を 10%混合した灰混合土壌について、植栽基盤としての適用性を調査するため、パンジーなどの生育試験を行ったところ、約 4 ヶ月の調査期間を通じて良好な生育を示した。土壌及び滲出水は時間の経過とともに、重金属類が溶出することもなく、植栽基盤として有効利用できることが判明した。

今後については、水銀の溶出原因を調査するとともに、溶出抑制灰の具体的な有効利用用途について検討を進めていく予定である。